



Fuentes de alimentación para dispositivos médicos implantables: marcapasos.

Javier Rodríguez¹

Docentes: Franco Simini, Jorge Lobo, Daniel Geido, Marcelo David.

¹Núcleo de Ingeniería Biomédica - Facultades de Medicina e Ingeniería - Universidad de la República, Uruguay

Email: Javier Rodríguez: jrodr[en]fing[.]edu[.]uy;

Resumen

Se describe las distintas opciones para alimentar un marcapasos, indicando la opción comercial más impuesta en la actualidad y comentando sobre futuras soluciones con mayor desempeño. Se comienza describiendo un marcapasos en términos generales y luego las distintas alternativas y tecnologías de baterías utilizadas. Finalmente se realiza una breve reseña del estado del arte en cuanto a baterías y otras fuentes de energía para alimentar dispositivos médicos implantables, particularmente marcapasos.

Palabras Clave: Batería, marcapasos, implantable, estimulación cardiaca, microgenerador.

1. Introducción

Cada uno de los latidos del corazón no es más que un conjunto de contracciones musculares que se desencadenan por impulsos eléctricos. Existe un marcapasos natural propio del corazón, el nódulo sinoauricular, que está formado por células eléctricamente activas. Este nódulo envía señales que atraviesan el corazón tal como si fuera un circuito eléctrico, provocando las contracciones a una frecuencia determinada. Este sistema puede fallar en forma transitoria sin provocar daño alguno, pero en algunos casos en que las fallas se vuelven crónicas, pueden provocar arritmias cardíacas que debilitan la funcionalidad del sistema circulatorio, pudiendo incluso comprometer la vida del paciente. Para éstos últimos casos es necesario utilizar un marcapasos artificial para ayudar o reemplazar la función del marcapasos natural.

Un marcapasos artificial implantable (MPI) es un dispositivo electrónico que envía pulsos eléctricos al corazón a una intensidad y frecuencia adecuada, provocando la contracción del músculo cardíaco, suplantando los pulsos eléctricos naturales faltantes. Dado que el dispositivo es

implantable, es necesario alimentarlo por algún medio que no implique conexiones al exterior. Además es deseable evitar la mayor cantidad de intervenciones quirúrgicas posibles y mantener una calidad de vida adecuada para el paciente.

La evolución de la tecnología ha permitido que los MPIs actuales hayan reducido su tamaño en forma considerable, sean altamente configurables, se adapten al ritmo del paciente, entre otros avances. En cuanto a longevidad, también existen importantes avances; un MPI actual tiene una vida media de 7 años (entre 5 y 10 años), la cual está dada casi exclusivamente por agotamiento de batería. Este último aspecto parece muy positivo, y lo es, pero si pensamos en que la edad de los pacientes que se implantan un MPIs ronda los 70 años, eso implica que el paciente deberá someterse a una intervención quirúrgica cada 7 años, o sea que estamos hablando de intervenciones quirúrgicas a edades avanzadas, 77, 84, 91 años. Si a esto le sumamos que existe hoy en día una población importante de personas de 40 años e incluso hasta adolescentes que utilizan MPIs, la cantidad de citas con el bisturí para estos otros pacientes supera a los dedos de una mano.

El método más generalizado para alimentar los MPIs hoy en día, es mediante baterías. Estas son de 2.8V y tienen una capacidad de entre 0.5Ah a 2Ah. La corriente media requerida para el funcionamiento de un MPI es puede acotar en $20\mu\text{A}$, por lo que, su consumo promedio se puede estimar en $60\mu\text{W}$. Este valor es la suma del consumo debido a la energía para estimular y la del propio circuito. Se destaca que entre el 50% y el 70% equivale al consumo del circuito. Además, para un dispositivo implantable, es importante también considerar la corriente de pico y su duración para generar el estímulo, pues esto tendrá un factor limitante en la resistencia interna de la fuente de energía y la dimensión del condensador en paralelo con esta. Afortunadamente la corriente de pico requerida para un MPI no es muy elevada, lo que permite utilizar baterías con resistencia interna muy alta. Se presenta en la tabla 1, las especificaciones típicas de un marcapasos a batería comercial actual.

Parámetro	Valor
Tensión de circuito abierto	2.8 a 3.0 V
Mínima tensión de funcionamiento	2.0 a 2.2 V
Corriente media	10 a $20\mu\text{A}$
Carga requerida en las baterías	0.5 a 2 Ah
Vida efectiva	5 a 10 años
Volumen que ocupa	5 a 8 cc

Tabla 1. Especificaciones típicas de las baterías de para un marcapasos

2. Primeras Baterías utilizadas en marcapasos

El primer marcapasos implantado con éxito en el mundo fue en febrero de 1960 en Uruguay por los Drs. Rubio y Fiandra. El dispositivo había sido desarrollado en Suecia por el Dr. Rune Elmquist y utilizaba **baterías de níquel-cadmio recargables**. Estas baterías se recargaban por 12 hs, 1 vez a la semana, a través de un enlace inductivo. La celda de voltaje era de 1.25V y de una capacidad de 190mAh. Tenía dos grandes problemas, uno era la corta vida útil y el otro, que no era deseable dejar en manos de los pacientes la recarga de la batería, no era una buena práctica médica. Si bien actualmente la capacidad de este tipo de baterías es mayor, no se comercializan más MPIs de este tipo.

La unidad implantada unos meses más tarde en EEUU se alimentaba de **celdas de mercurio-cinc**. Con 3 a 6 celdas se proveían entre 4 y 8 V. Estas baterías tenían un recubrimiento epoxy que era permeable al hidrógeno, el cual se derramaba hacia el interior del MPI provocando fallas prematuras en el circuito. Si bien se mejoró la tecnología, su vida útil no llegaba más allá de los dos años y la curva de descarga era extremadamente abrupta. Fueron ampliamente utilizadas por los años 60' y actualmente no hay MPIs con este tipo de baterías.



Figura 1. Marcapasos de 1961 conteniendo 2 transistores y 10 baterías de mercurio-cinc. (Tomado de [4]).

Se intentaron utilizar métodos biogalvánicos, celda de combustible (utilizando hidrógeno y oxígeno del cuerpo), generadores piezoeléctricos, pero ninguno de ellos tuvo éxito para uso en marcapasos. Mas adelante se comenta que esta idea continúa viva y seguramente se hará realidad.

Otro tipo de baterías que llegaron a ser utilizadas con éxito durante algún tiempo fueron las **baterías nucleares** que utilizaban plutonio (^{238}Pu) y tenían una vida media de 87 años, por lo que no necesitaban ser reemplazadas. Inicialmente se hacían de plutonio metálico y luego de óxido de plutonio cerámico, las que eran más seguras en cuanto a derrames. El gran problema de estas baterías siempre fue la toxicidad; apenas $1\mu\text{g}$ en el torrente sanguíneo podía llegar a ser fatal. Cuando los pacientes comenzaron a viajar, se crearon problema de otra índole, debido a la presencia de combustible radiactivo. Si bien estos MPI no se comercializan más, seguramente quedan algunos en servicio. Este tipo de batería comenzó a quedar obsoleta con el desarrollo de la batería de litio.

3. La batería de litio

En 1970 la longevidad de un MPI era de 2 años y en el 80% de los casos se detectaron fallas en las baterías. La aparición de las baterías de litio en 1971 fue sin duda un salto cualitativo.

Las **baterías de litio-Yodo (Li-I2)** han sido ampliamente utilizadas desde mediados de los 70', desplazando a las de mercurio-zinc y las nucleares, y convirtiéndose en el estándar de la industria. A lo largo de los años, ha habido mejoras en estas baterías; tal es así, que la densidad de energía de una batería de litio-yodo actual supera en tres o cuatro veces la de una de 1972.

Este tipo de batería tiene dos características que la hacen excelente para ser utilizada en MPIs. Por un lado, tiene una autodescarga muy lenta, lo que la hace tener un tiempo de vida muy largo, permitiendo una duración de más de 10 años. Por otro, la tensión de vacío se mantiene estable a lo

largo de la vida útil, comenzando a decrecer de forma gradual y predecible, lo que es importante para ayudar e estimar la fecha de sustitución de la batería.

Las baterías de litio-yodo proveen una tensión de vacío de 2,8V, tienen una densidad de energía de 200Wh/Kg y su resistencia interna inicial se encuentra entre los 100 Ω y 500 Ω . A medida que se va agotando, según se observa en la figura 2, la resistencia interna aumenta, alcanzando valores de unos miles de ohmios, mientras que la tensión en vacío se mantiene casi fija e igual a la nominal (mientras la capacidad sea superior al 10% de la capacidad nominal). Debido a la pequeña corriente necesaria para alimentar un MPI, este incremento en la resistencia interna no implica una significativa caída de tensión en bornes de la batería.

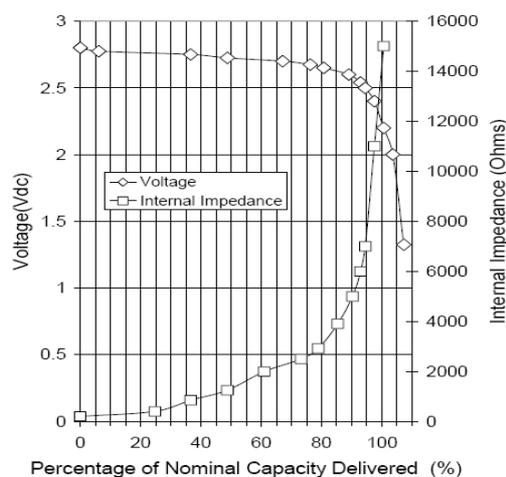


Figura 2. Descarga de una batería de litio-yodo utilizando una carga resistiva de 100K Ω . (Tomado de [2])

Para estimar la vida restante de la batería, se utiliza un circuito que mide su resistencia interna y deduce de allí el tiempo restante de vida. Esto permite planificar con antelación el reemplazo de la batería. Si bien esto es una gran ventaja, al mismo tiempo impide su uso para algunos marcapasos avanzados que tiene un consumo algo mayor al habitual.

Actualmente ésta es la batería que utilizan la mayoría de los marcapasos comerciales.

4. Nuevas baterías de litio

En el intento de disponer de fuentes de energía con mayor densidad y baja resistencia interna se propusieron varias baterías a base de litio. Se pueden citar las baterías de litio sulfuro de cobre, litio-cromato de plata, litio-cloruro de tionilo, entre otras, pero ninguna tuvo aceptación total en MPIs (sí en otro tipo de dispositivos).

La que mostró una diferencia que la pone como atractiva candidata es la **batería de litio-monofluoruro (Li-CFx)**. Esta batería, también provee una tensión de 2.8V en vacío, pero su densidad de energía es muy superior (teóricamente 2435 Wh/Kg, siendo la densidad de la batería de litio-yodo de 200Wh/Kg), y puede entregar corrientes de pico por encima de los 20mA sin una

caída significativa de tensión, lo cual también supera a las baterías de litio-yodo convencionales. Esta batería se utiliza en sistemas implantables de infusión de drogas y en neuroestimuladores y lentamente se está comenzando a utilizar también en MPIs.

Recientemente ha sido desarrollada la **batería de litio-ion recargable** para ser utilizada en dispositivos médicos implantables. Este tipo de baterías puede proveer pulsos de altas corrientes ($>1A$), además no sería necesaria una batería tan grande (una capacidad de 100mAh sería suficiente), por lo que se puede reducir aún más el tamaño del MPI.

En cuanto a la longevidad, los ciclos de carga/descarga que soportan estas baterías son inversamente proporcionales a la descarga a que se la someta. Como referencia, en una batería de 100mAh, para un 4% de descarga soporta 8000 ciclos [7]. Esta descarga corresponde a un MPI consumiendo $20\mu A$ durante 8 días. En este régimen de uso y manejando solo este parámetro, un MPI tendría una vida útil máxima de 175 años.

Si bien con esta forma de alimentar al MPI no sería necesaria una intervención quirúrgica para reemplazar baterías, se agrega la necesidad de recargarlas periódicamente. Como referencia, utilizando un sistema de recarga por medio de luz infrarroja a través de la piel [7], son necesarios en promedio unos 17 minutos de carga por día (2 hs. por semana). Por supuesto que no sería necesario cargarla tan seguido pues esta batería puede durar 6 meses manteniendo la tensión de alimentación por encima de los 2.4V.

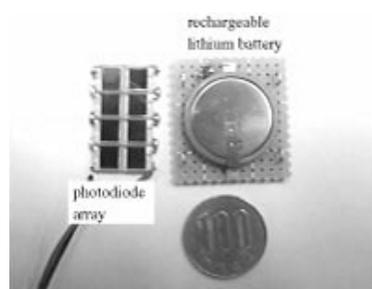


Figura 3. Array de fotodiodos (Izq) para recargar la batería (der.). Se compara el tamaño con una moneda de 23mm de diámetro (abajo). (Tomado de [7])

Si bien este último caso podría ser una solución para evitar la intervención quirúrgica, sería muy interesante pensar en utilizar la energía del propio cuerpo para alimentar al MPI. Existen hoy en día diversos estudios que podrían lograr la existencia de un “MPI de por vida y libre de mantenimiento”. A continuación se describen algunos de estas fuentes alternativas de energía.

5. Microgenerador micromecánico para marcapasos[9]

A continuación se describe un microgenerador que se basa en la tecnología de Sistemas Micro Electro-Mecánicos (SMEM, en inglés MEMS: *Micro Electro Mechanical Systems*) y que se pretende utilizar como fuente de alimentación para los MPIs actuales.

La idea básica de este microgenerador para ser utilizado en MPIs consiste en aprovechar los movimientos fisiológicos del cuerpo humano para desestabilizar un péndulo semicircular alrededor de un eje e inducir un voltaje sobre los bornes de una bobina. Un esquema de este microgenerador se describe en la figura 4.

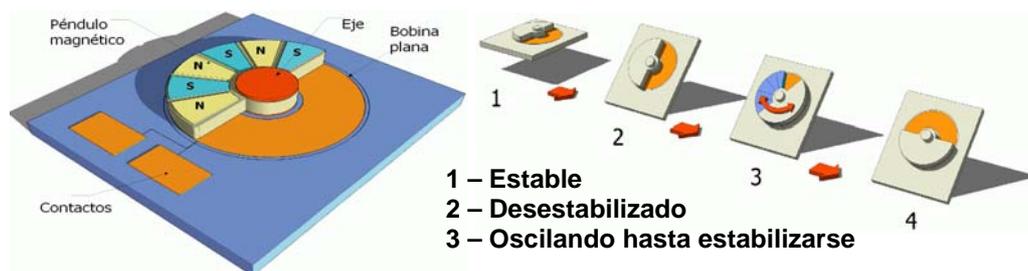


Figura 4. Esquema del microgenerador y su principio de funcionamiento. (Tomado de [9])

Cuando el péndulo deja su posición estable debido a un movimiento de algún órgano, cabeza, extremidad, etc, del cuerpo, comienza a oscilar por algún tiempo hasta que alcanza nuevamente una posición estable. Durante este proceso, un campo magnético cambiante atraviesa la bobina plana induciendo una tensión entre sus terminales.

Durante la operación, existen fuerzas de fricción y desgaste por uso entre el péndulo y el eje. Es deseable maximizar, por un lado, la energía extraída, y por otro, la vida útil del dispositivo. Por esto se ha prestado especial atención en esta interfase, ya que los mecanismos de rodamiento convencionales no satisfacen los requerimientos, debiendo recurrir a un superlubrificante basado en nanotecnología (nanopartículas Fullerenolike IF-WS2¹).

En la tabla 2 se presentan las especificaciones para dos versiones. Se puede observar que para la versión más pequeña, la potencia generada es suficiente para alimentar a un MPI.

Parámetro	Unidades	Versión pequeña	Versión grande
Área generador completo	mm x mm	1 x 1	2 x 2
Ancho del péndulo magnético	μm	100	100
Radio del péndulo	μm	500	1000
Espacio péndulo-bobina	μm	10	10
Resistencia de la bobina	KΩ	3.0	1.5
Tensión RMS de salida en vacío	V	1.1	3.0
Potencia RMS de salida	μW	390	6250

Tabla 1.- Especificaciones para 2 versiones de microgeneradores

Un problema que se puede presentar, es que los movimientos del paciente sean en sentido perpendicular al eje, provocando una desestabilización insuficiente del péndulo en cuanto a generación de energía se refiere. Para asegurar que esto no ocurra, se pueden montar 3 generadores, uno por cada eje axial según se muestra en la figura 5.

En relación con las baterías utilizadas actualmente en marcapasos, este microgenerador puede entregar más energía por unidad de volumen y peso, y tendrían además una vida útil mayor. Si se tiene presente que el 30% a 40% del tamaño de un marcapasos es ocupado por la batería, esta tecnología, además, puede ayudar a que sean aún más pequeños. Este sistema mecánico de larga duración y libre de mantenimiento, podría minimizar la frecuencia de cirugías invasivas tal como se hace hoy con los marcapasos a batería cuando esta se agota.

¹ El fullerenolike es una nanopartícula alotrópica del carbono. El fullerenolike es un caso particular. Tiene 10nm de diámetro.

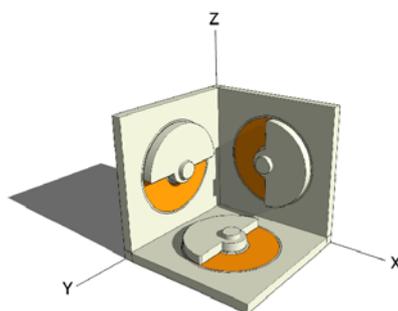


Figura 5. Disposición de 3 generadores para asegurar generación en cualquier sentido de movimiento. (Tomado de [9])

Para lograr los requerimientos eléctricos para otro tipo de dispositivos médicos implantables, es posible interconectar gran cantidad de estos microgeneradores.

6. Generador biotérmico para marcapasos [13, 14 y 15]

La tecnología se basa en la utilización del efecto termocupla, en el cual una pequeña caída de tensión es generada en la unión entre 2 materiales distintos los cuales se mantienen a diferente temperatura. Para maximizar este efecto se utilizarían semiconductores especiales, recurriendo a la nanotecnología.

Para el funcionamiento serían necesarios al menos 2°C de diferencia, lo que deja una tranquilidad, porque hay varias partes del cuerpo que pueden diferir en hasta 5°C . Pero, por otro lado, cada termocupla podría solo generar unos pocos microvolts por cada 1°C de diferencia, por lo que serían necesarias miles y miles de unidades en serie. Gracias a los avances de la nanotecnología, en un reducido espacio se pueden colocar gran cantidad de estos pequeños nodos semiconductores que transforman el calor en electricidad.



Figura 6. Así sería un generador biotérmico comparado con una moneda. (Tomado de [15]).

Se estima que este generador térmico del tamaño que se muestra en la figura 6, podría entregar una potencia de $100\mu\text{W}$ con una tensión en bornes de 4V.

7. Celda de combustible microbiano para marcapasos [16]

Se ha realizado un estudio sobre la posibilidad de utilizar celdas de combustible microbiano (MFC – *Microbial Cell Fuel*) para generar energía para alimentar un MPI.

Las MFCs son un tipo de celda de combustible tal que es capaz de utilizar procesos metabólicos de los microorganismos para generar energía eléctrica a partir de energía química. Al igual que las celdas de combustible de hidrógeno, las MFCs poseen un compartimiento llamado ánodo y otro cátodo. Los microbios en el ánodo consumen un sustrato y lo oxidan liberando electrones que viajan hacia el cátodo a través del circuito, y a su vez se producen iones positivos que viajan al cátodo. Finalmente los electrones se reducen con los iones positivos completando el ciclo (Figura 7 izquierda).

Otro combustible con el que pueden operar las MFCs es la glucosa, la cual se encuentra en el torrente sanguíneo y otras partes del cuerpo.

Desde el punto de vista energético se puede deducir en forma teórica que es posible obtener la suficiente energía para alimentar a un MPI, tanto utilizando glucosa como microbios. Los métodos para utilizar la glucosa son, directamente del torrente sanguíneo o de la capa subcutánea del abdomen. Ambos métodos se encuentran (2006) en estudio y aún se deben responder muchas interrogantes al respecto.

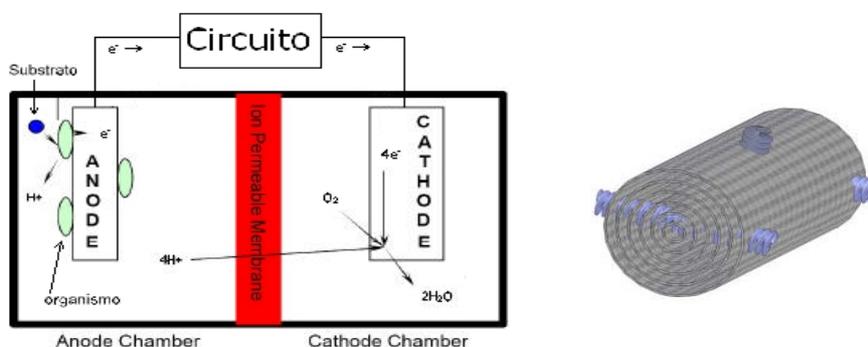


Figura 7. Esquema de la MFC (izq.). Electrodo conceptual para el intestino. (Tomado de[16]).

Otra opción sería implantar el ánodo dentro del intestino largo con forma de seis tubos concéntricos, y el cátodo en la zona subcutánea del abdomen. Ánodo y cátodo podrían estar conectados a través de un orificio en el intestino. Teóricamente se puede deducir que para alimentar un MPI se requeriría un ánodo de 12,5 cm de largo. El tamaño del cátodo no afecta la potencia a adquirir. El principal problema que tiene esta opción es el orificio en el intestino.

Esta tecnología aún se encuentra en investigación (2006) y tiene muchas interrogantes.

² Los nanotubos del carbono son tubos de redes hexagonales del carbono cuyas dimensiones son del orden de : largo $\sim\mu\text{m}$ y diámetro 1 a 30 μm . Su estructura los hace potencialmente útiles para nanosistemas eléctricos y mecánicos.

8. Baterías de nanotubos [17]

Si bien el desarrollo de baterías de nanotubos de carbono ² no es específico de MPIs, sino que su uso sería más bien general, se realiza una reseña sobre ellas pues, de acuerdo a los estudios realizados, seguramente podrán cambiar la forma de alimentar un MPI sobre todo por la estabilidad y seguridad que promete.

El principio de estas baterías se basa en los capacitores de doble capa, pero utilizando nanotubos de carbono. Para estos dispositivos la capacidad está dada por:

$$C = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{d}$$

donde A es el área y d la distancia entre capas. Lo importante de esto es que trabajando con nanotubos, se pueden obtener áreas del orden de 2000 m²/g y distancias tan pequeñas como 1 nm.

Mientras la densidad de energía alcanzada por una batería de litio-ion recargable es de 120Wh/Kg, los análisis han demostrado que utilizando una matriz de nanotubos de carbono alineados verticalmente como una estructura de electrodo, se obtendría un ultracapacitor caracterizado por una densidad de potencia tan grande como 100KW/Kg, una densidad de energía de 60Wh/Kg y unos 300.000 ciclos de carga/descarga.

El impacto mayor de estas baterías estará dado por la gran potencia que pueden suministrar, la rapidez para ser cargadas (minutos), la confiabilidad y seguridad. Estos factores seguramente serán más beneficiosos para otros dispositivos implantables, aunque disponer de una fuente de energía recargable en muy poco tiempo y con alta confiabilidad puede también ser muy útil para los MPIs.

9. Conclusiones

Es claro que la forma de alimentar un MPI cambiará en poco tiempo. Ya se dispone (desde el punto de vista de la alimentación) de un sistema para evitar la cita con el bisturí (al menos tan frecuentemente) utilizando baterías de litio-ion recargables. Este sistema incluso podría ser utilizado con alguno de los generadores mencionados y evitar además la necesidad de recargar la batería con tanta frecuencia y hasta no necesitar recargarla. También sería posible alimentar el MPI directamente desde uno de los generadores, lo que dependerá de los estudios de confiabilidad.

Con respecto a las baterías de nanotubos de carbono, se aumentaría la confiabilidad del sistema de alimentación y además se podrían utilizar solo éstas, ya que su carga permanecería casi invariante si no se la utiliza, bastaría utilizar una batería de este tipo con la carga suficiente para cada paciente.

10. Agradecimientos

Al la Lic. Julia Demasi por ayudarme con la búsqueda de algunos artículos, al Ing. Rodrigo Duarte por auxiliarme en momentos complicados y estar siempre a la orden y en especial a mi señora e hijos por permitirme realizar este trabajo en momentos en que me necesitaban.

11. Referencias

- [1] Webster, JG. “*Design of Cardiac Pacemakers*”. Piscataway, NJ: IEEE Press; 1995.
- [2] F. Silveira, C. Rossi, A. Arnaud. “*Requisitos de los dispositivos médicos implantables desde el punto de vista del diseñador*”. Unidad 1, Curso 2006: “Diseño de CIs para dispositivos médicos implantables”. UAB – Master en Tecnologías Convergentes.
- [3] V. S. Mallela, V. Ilankumaran, and N.S. Rao, “*Trends in Cardiac Pacemaker Batteries*”, Indian Pacing and Electrophysiology Journal, vol. 4, no. 4, pp. 201-212, 2004.
- [4] Curtis F. Holmes. “*The Role of Electrochemical Power Sources in Modern Health Care*”. The Electrochemical Society Interface. 1999.
- [5] F. Simini y otros. “*Ingeniería Biomédica perspectivas desde el Uruguay*”. Núcleo de Ingeniería Biomédica. F. Medicina – F Ingeniería. UdelaR. abril 2007
- [6] Wilson Greatbatch, Curtis F. Holmes. “*History of Implantable Devices*”. IEEE Engineering in medicine and Biology. September 1991.
- [7] K. Goto, T. Nakagawa, O. Nakamura, and S. Kawata. “*An Implantable Power Supply with an Optically Rechargeable Lithium Battery*”. IEEE Transactions on biomedical engineering, Vol. 48, Nº. 7, July 2001
- [8] M. Alais, “*Long-life thermoelectric generator*”. US Patent 3,945,854, 23 marzo 1976
- [9] J. Martinez-Quijada, S. Chowdhury. “*Body-Motion Driven MEMS Generator for Implantable Biomedical Devices*”, University of Windsor. April 20, 2007
- [10] A.M.Skundin, S.A.Fateev, and T.L.Kulova. “*Battery for cardiac pacemaker: an alternative to lithium-iodine system*”
- [11] S. R. Alavi-Soltani and T.S. Ravi. “*Bioengineering Applications of Lithium Batteries*”. Wichita State University, USA. 2006.
- [12] J. Aguiló. “*Convergencia Nano-Bio: Nanoestructuras y nanoherramientas*. Unidad 2, Curso 2005: “Tecnologías convergentes (MNCIB)”. UAB – Master en Tecnologías Convergentes
- [13] <http://www.newscientist.com/article/dn5091-power-implant-aims-to-run-on-body-heat.html> del 16/06/2004. Accedido el 10/06/07.
- [14] http://news.bbc.co.uk/1/hi/spanish/science/newsid_3800000/3800277.stm del 11/06/2004. Accedido el 10/06/2007.
- [15] http://www.biophan.com/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=119. Accedido el 10/06/2007.
- [16] Clayton Bettin. “*Applicability and Feasibility of Incorporating Microbial Fuel Cell Technology into Implantable Biomedical Devices*”. The Ohio State University, 2006.
- [17] R. Signorelli, J. Schindall, J. Kassakian. “*Carbon Nanotube Enhanced Ultracapacitor*”. LESS - MIT
- [18] http://www.elestim-cardio.ru/proizvod_en.html Elestimo-cardio Rusia, Moscow. Fabrica MPs con Baterías de litio yodo. Accedido el 10/06/2007
- [19] <http://www.greatbatch.com> Fabricantes de baterías. Accedido el 10/06/2007
- [20] www.ccc.com.uy. Fabricantes de MPIs. Montevideo, Uruguay. Accedido el 10/06/2007

